

Journal of Water and Wastewater, Vol. 31, No.2, pp: 16-23

Accelerated Photochemical Degradation of Acetamipirid Insecticide Over the Ag/AgBr Nanospheres under Visible Light

M. Padervand¹, E. Jalilian²

1. Assist. Prof. Dept. of Chemistry, Faculty of Science, University of Maragheh, Maragheh, East Azarbaijan, Iran (Corresponding Author) padervand@maragheh.ac.ir
2. Former Graduate Student, Dept. of Chemistry, Faculty of Science, University of Maragheh, Maragheh, East Azarbaijan, Iran

(Received Oct. 21, 2018 Accepted May 15, 2019)

To cite this article:

Padervand, M., Jalilian, E., 2020. "Accelerated photochemical degradation of acetamipirid insecticide over the Ag/AgBr nanospheres under visible light" Journal of Water and Wastewater, 31(2), 16-23. Doi: 10.22093/wwj.2019.153173.2765 (In Persian)

Abstract

During the last decades, removal of wastewaters using visible active photocatalytic systems has attracted great attention which led to development of various nanostructured photocatalysts toward purification. Among such contaminants, products including those used in agricultural applications like insecticides and pesticides are of great importance. In this project, the unique Ag/AgBr nanospheres were prepared by a facile single-step co-precipitation method in the presence of 1-Butyl-3-methylimidazolium bromide ([BMIM]Br) ionic liquid (IL) and CTAB as the halide source and surfactant, respectively. The products were well characterized by X-ray diffraction powder (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS), and nitrogen adsorption-desorption isotherms (BET). The XRD pattern confirmed the presence of both AgO and AgBr crystalline phases in the structure well. In addition, the SEM micrographs indicated that the sample has the spherical morphology and the particles size is below 100 nm. According to the photocatalytic experiments, the product was very efficient for the degradation of acetamipirid insecticide solutions under visible light. Also, the results implied that the photoreaction obeyed first order kinetic and the rate constant was evaluated to be 0.145 h⁻¹.

Keywords: Acetamipirid, Photocatalyst, AgBr, Wastewater, Visible Light.

مجله آب و فاضلاب، دوره ۳۱، شماره ۲، صفحه: ۲۳-۱۶

واکنش فوتوشیمیایی تسریع شده تخریبی حشره کش استامپیرید بر روی نانوذرات نقره / برمید نقره تحت نور مرئی

محسن پادروند^۱، الهام جلیلیان^۲۱- استادیار، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه مراغه، مراغه، آذربایجان شرقی، ایران
(نویسنده مسئول) padervand@maragheh.ac.ir۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه مراغه،
مراغه، آذربایجان شرقی، ایران

پذیرش ۹۸/۲/۲۵

دریافت ۹۷/۷/۲۹

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

پادروند، م.، جلیلیان، ا.، ۱۳۹۹، "واکنش فوتوشیمیایی تسریع شده تخریبی حشره کش استامپیرید بر روی نانوذرات نقره/نقره برمید تحت نور مرئی" مجله آب و فاضلاب، ۳۱(۲)، ۲۳-۱۶. Doi: 10.22093/wwj.2019.153173.2765

چکیده

تخریب و تصفیه آلاینده‌های محیط زیستی به کمک فرایندهای فوتوکاتالیزوری بر پایه ترکیبات نیمه رسانای فعال تحت نور مرئی و انرژی خورشیدی روش جدیدی است که در این راستا در دهه‌های اخیر، طیف گسترده‌ای از نانو ساختارهای جدید سنتز، معرفی و به کار گرفته شده‌اند. از مهم‌ترین آلاینده‌ها، ساختارهای فعال ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و مصارف خانگی نظیر حشره‌کش‌ها و آفت‌کش‌ها هستند. این آلاینده‌ها به واسطه سمیت ذاتی و داشتن گروه‌های عاملی و پیوندهای سبب نشده، تحت تابش خورشیدی در محیط‌های آبی تجزیه می‌شوند و آلاینده‌های ثانویه‌ای ایجاد می‌کنند که اکثراً سرطان‌زا هستند و حیات اکوسیستم را در درازمدت به خطر می‌اندازند. در این پژوهش نانوذرات برمید نقره با ریخت‌شناسی کروی یک شکل به روش رسوبدهی شیمیایی با استفاده از مایع یونی مناسب (به‌عنوان منبع هالید) سنتز، با روش‌های XRD، BET، DRS، و SEM شناسایی و فعالیت آن‌ها در راستای حذف آلاینده استامپیرید تحت نور مرئی، بررسی شد. آنالیز XRD به خوبی حضور فاز کریستالی ماده مورد نظر را تأیید کرد. همچنین آنالیز DRS به صورت تقریبی میزان نوار انرژی نیمه رسانا را تخمین زد و فعال بودن آن در ناحیه مرئی را تأیید کرد. نتایج آزمایش‌های فوتوکاتالیزوری نشان داد نانوفوتوکاتالیزور سنتز شده قادر است در کمتر از ۱۲ ساعت، آلاینده را به میزان قابل توجهی از محیط حذف کند، همچنین سرعت واکنش از معادله سینتیکی شبه مرتبه اول پیروی کرد و ثابت سرعت معادل 0.145 h^{-1} بود.

واژه‌های کلیدی: استامپیرید، فوتوکاتالیست، AgBr، فاضلاب، نور مرئی

۱- مقدمه

خاکی با استفاده از فرایندهای پیشرفته تسریع شده فوتوکاتالیزوری پرداخته شده است (Tian et al., 2018, Hua et al., 2018, Padervand, 2016b). علاوه بر این، تصفیه پسماندهای مضر پایدار به کمک جاذب‌های طبیعی و میکروارگانیزم‌ها، از جمله پژوهش‌هایی هستند که هم در داخل و هم در خارج از کشور به آن پرداخته شده است

در زمینه تخریب فوتوشیمیایی آلاینده‌های صنعتی و خانگی گزارش‌های مختلفی در قالب ثبت اختراع در کشورهای مختلف از جمله آمریکا و همچنین در قالب پژوهش‌هایی در نشریات معتبر بین‌المللی به چاپ رسیده است که از آن جمله می‌توان به مواردی اشاره کرد که به حذف فاز گازی آلاینده‌های محیط زیستی و همچنین طراحی سیستمی جامع برای حذف آلاینده‌های آبی و

شکل AgBr تحت نور مرئی است. همچنین شناسایی ساختار سنتز شده و مکانیسم تخریب فوتوکاتالیزوری بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

نمک‌های $AgNO_3$ و مایع یونی ۱-بوتیل-۳-متیل ایمیدازولیوم برمید^۱ به‌عنوان به‌ترتیب منبع نقره و برم در سنتز نانوذرات فوتوکاتالیستی مورد استفاده قرار گرفتند. ستیل متیل آمونیوم برمید^۲ به‌عنوان سورفکتانت شکل‌دهنده ذرات و آب دو بار تقطیر در تمامی مراحل سنتز مورد استفاده قرار گرفت. تمامی مواد شیمیایی از شرکت کیمیا اکسیر نمایندگی شرکت مرک^۳ در ایران خریداری و بدون خالص سازی بیشتر، استفاده شدند.

۲-۱- سنتز نانوساختارهای کروی شکل AgBr

نمک منبع نقره در مقدار مناسب آب دو با تقطیر حل شد. مایع یونی BMImBr در محلول آبی حاوی سورفکتانت CTAB حل شد. با استفاده از همزن دور تند و در دمای اتاق، محلول مایع یونی بعد از شفاف شدن قطره-قطره به محلول نمک نقره اضافه شد (Padervand, 2016a). بعد از یک ساعت در دستگاه همزن و در دمای ۷۰ درجه سلسیوس، رسوب حاصل از فیلتر، سه بار با آب مقطر شستشو و در نهایت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شد. در انتها، محصول در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۳ ساعت کلسینه و برای کاربردهای بعدی پودر شد.

۲-۲- آزمایش‌های فوتوکاتالیزوری

همه آزمایش‌ها در یک راکتور از جنس پیرکس حاوی محلول‌های با غلظت معین از آلاینده (۵۰، ۵۰ ppm میلی‌لیتر) و مقدار ۰/۰۲۵ گرم از پودر جامد، با قابلیت تنظیم دما از طریق اتصال به ورودی و خروجی یک حمام خارجی حاوی آب در دمای ۲۸ درجه سلسیوس، انجام شد (Padervand, 2017a). اسیدیته محیط واکنش، همان pH معمولی محلول آبی رنگ استامپیرید و برابر ۶/۸ بود. منبع نور مرئی، لامپ اسرام ۱۲۵ وات به فاصله ۲۰ سانتی متر در بالای راکتور تعبیه شد. راکتور بر روی یک همزن

(Padervand, 2017a, Padervand, 2016a, Chen et al., 2018)

در سال‌های اخیر نانوساختارهایی با فرمول شیمیایی اصلاح شده و قدرت جذب و مساحت سطح ویژه زیاد بر اساس به‌کارگیری پیش‌ماده‌های مناسب برای سنتز، ساخته شده‌اند (Demirci et al., 2016)

گزارش‌هایی که در چند دهه اخیر در زمینه کاربرد فرایندهای فوتوکاتالیستی در حذف فوتوشیمیایی تسریع شده آلاینده‌ها به چاپ رسیده است، به‌طور عمده‌ای بر روی توسعه نیمه‌رساناهای فعال در ناحیه مرئی و انرژی خورشیدی تمرکز داشته‌اند (Hu et al., 2018, Ahmad and Majid, 2018, Wang et al., 2018, Zhang et al., 2018)

احمد و همکاران طی بررسی فعالیت فوتوکاتالیزوری نانوساختارهایی از CdO و گرافن اکسید دریافتند که کامپوزیت با ۳/۳ درصد گرافن اکسید، موجب تخریب بیش از ۹۸ درصد آلاینده‌های متیلن بلو و رودامین B می‌شود (Ahmad and Majid, 2018)

ترکیبات نیمه‌رسانای بر پایه هالیدهای نقره به دلیل فعالیت فوتوکاتالیزوری مناسب و ارزان بودن، به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته و نانوساختارهای متنوعی از آن‌ها معرفی شده است (Tang et al., 2012, Guo et al., 2018, Zhan et al., 2018, Tao et al., 2018)

ساخت کامپوزیت‌هایی با نوار انرژی باریک و پایداری مناسب برای آزمایش‌های چندباره تخریب آلاینده در کاربردهای عملی آن، همواره مورد توجه کارشناسان و پژوهشگران بوده است. مایعات یونی که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده در زمینه طراحی و سنتز چارچوب‌های متخلخل با اشکال منحصر بفرد مورد استفاده قرار گرفته‌اند و همچنین توسعه روشی تک مرحله‌ای و سریع برای سنتز نانوساختارهای فوتوکاتالیزوری یک ترکیب مؤثر از این عناصر از نکات مهمی است که در انجام این پژوهش و دستیابی به فوتوکاتالیزور نهایی مورد توجه قرار گرفته است.

هدف از انجام این پژوهش، تخریب فوتوشیمیایی حشره‌کش استامپیرید به‌عنوان یک نمونه پساب حاصل از فعالیت صنایع کشاورزی از اکوسیستم‌های آبی آلوده با استفاده از نانوذرات کروی

¹ BMImBr

² Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide (CTAB)

³ Merck

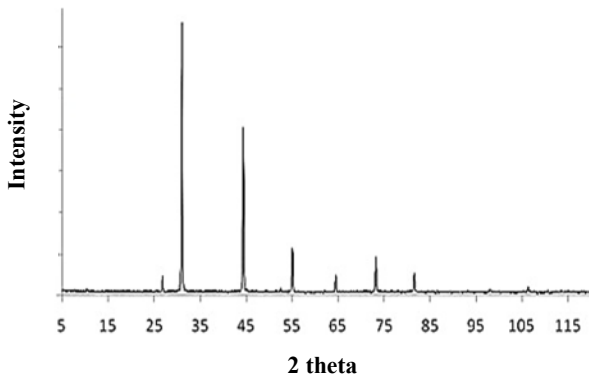


Fig. 1. The XRD pattern of the prepared nanostructure

شکل ۱- الگوی XRD نانوساختار سنتز شده

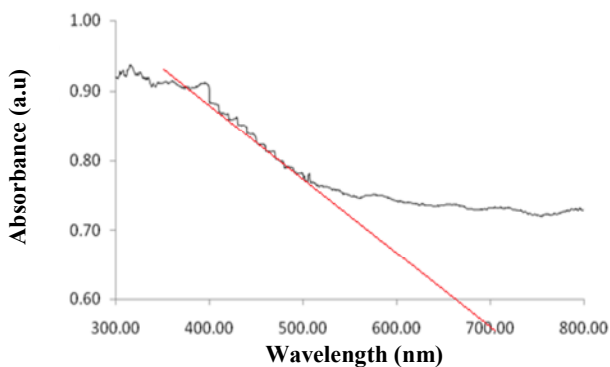


Fig. 2. DRS spectrum of the prepared photocatalyst

شکل ۲- طیف DRS فوتوکاتالیست سنتز شده

سنتز شده و با استفاده از معادله $E_g = 1239.8/\lambda$ انرژی نوار نیمه رسانا معادل $1/9$ الکترون ولت برآورد شد که این مطلب مؤید نوار انرژی منطبق با نواحی کم انرژی (مرئی) برای فوتوکاتالیست سنتز شده است. برای برآورد این پارامتر، مقدار جذب در مقابل طول موج رسم شد و محل تلاقی با محور افق در برونیاپی، به عنوان طول موج مطابق با انرژی نوار نیمه رسانا (652 نانومتر) در نظر گرفته شد.

نتایج حاصل از آنالیز مساحت سطح^۲ و لوپ هیسترسیس^۳ به دست آمده از منحنی جذب-واجذب نیتروژن نیز نشان داد که فوتوکاتالیست سنتز شده از مساحت سطح ($1/8 \text{ m}^2/\text{g}$) قابل قبولی نسبت به نمونه‌های مشابه سنتز شده در پژوهش الهی فرد و همکاران برخوردار نیست و جذب سطحی، نقش قابل توجهی در حذف

مغناطیسی قرار گرفت و همزن مغناطیسی با دور ثابت 500 rpm محلول حاوی فوتوکاتالیزور را هم زده و در بازه‌های زمانی مشخص، مقدار 2 میلی‌لیتر از محلول برداشته شد و بعد از سانتریفوژ برای جدا کردن ذرات جامد از محلول، غلظت آلاینده موجود در محلول به کمک دستگاه اسپکتروفوتومتر UV در طول موج جذبی آلاینده مربوطه (244 نانومتر) تعیین شد.

۳-۲- شناسایی ساختارهای سنتز شده

الگوهای XRD با دستگاه Bruker D8 و تابش $\text{CuK}\alpha$ در طول موج 0.15406 نانومتر ثبت شد. مساحت سطح ویژه و توزیع اندازه حفرات در دمای 77 کلون با استفاده از ایزوترم‌های جذب-واجذب نیتروژن بر روی دستگاه Belsorp ساخت کشور ژاپن انجام شد. مورفولوژی و میانگین اندازه ذرات بر روی سطح با استفاده از دستگاه SEM مدل XL30 بررسی شد. همچنین خواص نوری و الکترونی نمونه با دستگاه اسپکتروفوتومتر مدل Cintra40 بررسی شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- شناسایی نانوساختارهای سنتز شده

الگوی XRD نانوذرات سنتز شده در شکل ۱ ارائه شده است. پیک‌های مشخصه فاز کریستالی AgBr در $2\theta = 26.7, 31.0, 44.3, 55.0, 64.9, 74.0, 83.6$ درجه قابل تشخیص است. این پیک‌ها به ترتیب به صفحات کریستالی $111, 200, 220, 222$ فاز برمید نقره مکعبی نسبت داده می‌شوند. به علاوه، پیک در $2\theta = 65.0$ درجه به حضور گونه‌های Ag^0 در ساختار نمونه نسبت داده می‌شود (JCPDS no. 04-0783). همانگونه که مشخص است نانوذرات سنتز شده به‌طور قابل توجهی کریستالیزه شده و فاز آمورف در نمونه ملاحظه نمی‌شود. مهم‌ترین عوامل در نیل به این نتیجه استفاده از پیش‌ماده‌های مناسب به‌ویژه مایع یونی به‌عنوان منبع هالید و همچنین شرایط محیطی اعمال شده بر محیط سنتز است.

طیف بازتابشی واپاشی^۱ نانوفوتوکاتالیزور سنتز شده در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به الگوی به‌دست آمده برای نمونه

² Brunauer, Emmet and Teller (BET)

³ Hysteresis

¹ Diffuse Reflection Spectroscopy (DRS)

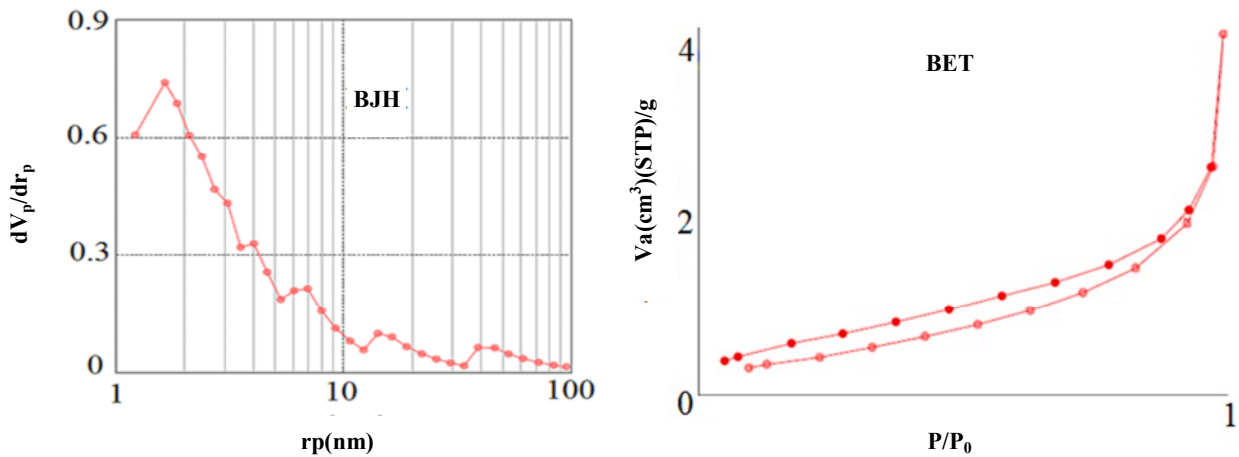


Fig. 3. The N₂ adsorption-desorption isotherm and the BJH curve
شکل ۳- منحنی جذب-وا جذب نیتروژن و منحنی بدست آمده از آنالیز BJH

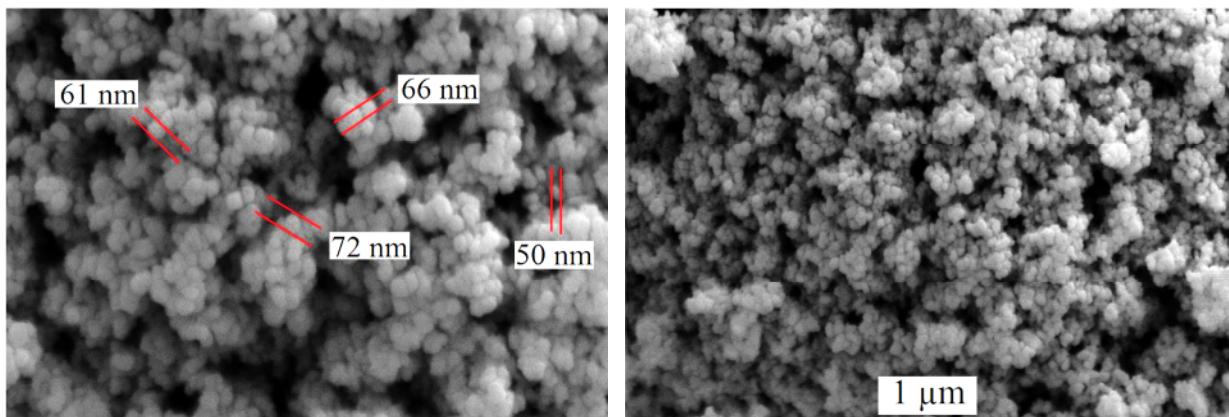


Fig. 4. The SEM images of the prepared nanostructures
شکل ۴- تصاویر SEM نانو ساختارهای سنتز شده

نشان می‌دهد که نانوذرات سنتز شده کروی شکل و از توزیع اندازه یک شکل برخوردار هستند. همچنین میانگین اندازه ذرات، کمتر از ۱۰۰ نانومتر است.

۲-۳- تخریب آلاینده استامیپیرید توسط نانوذرات سنتز شده تحت نور مرئی

ذرات فوتوکاتالیزوری سنتز شده با جذب فوتون‌های با انرژی در ناحیه مرئی، تحریک می‌شوند و زوج الکترون-حفره (e-h) تولید می‌کنند. از آنجایی که زوج e-h توانایی زیاد اکسندگی و کاهش‌دهنده دارد، با گونه‌های موجود در محیط آبی مانند اکسیژن مولکولی و گروه‌های هیدروکسیل آنیونی واکنش می‌دهد و رادیکال‌های فعال از جمله رادیکال OH[•] تولید می‌کند. به دلیل داشتن الکترون زوج

آلاینده در حضور ساختار سنتز شده ندارد. (Elahifard et al., 2007)

برای آنالیز دقیق‌تر مورفولوژی ترکیب سنتز شده، آزمون BJH^۱ که توزیع و اندازه میانگین حفرات را در ساختار مشخص می‌کند، انجام شد و منحنی به دست آمده نشان داد که بیشینه توزیع اندازه حفرات کمتر از ۱۰ نانومتر است و ساختار سنتز شده مزوپور است. منحنی آزمون BJH در شکل ۳ نشان داده شده است. برای بررسی مورفولوژی و شکل ظاهری ذرات فوتوکاتالیزوری سنتز شده آنالیز SEM^۲ انجام شد. تصاویر SEM نانوذرات فعال نور مرئی سنتز شده در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده این تصاویر

¹ Barrett Joyner Halenda (BJH)

² Scanning Electron Microscope (SEM)

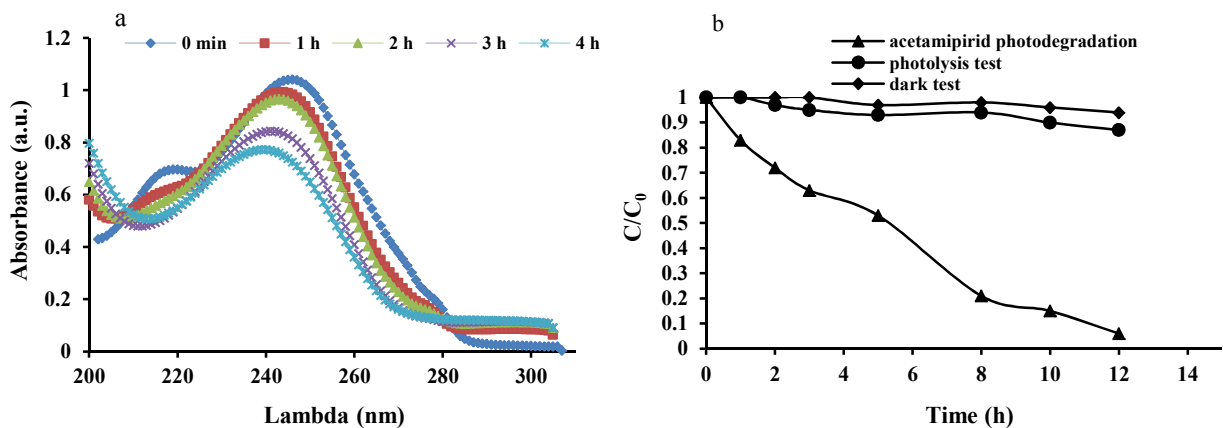


Fig. 5. UV-vis spectrum during 4 h of the reaction time (a) and the results of acetamiprid degradation over the prepared nanospheres (contaminant: 50 ppm, photocatalyst: 0.025 g)

شکل ۵- طیف UV-vis (a)، در بازه زمانی زیر ۴ ساعت از واکنش و بازدهی (b) نتایج تخریب آلاینده استامپیرید بر روی نانوذرات کروی شکل سنتز شده (غلظت آلاینده: ۵۰ ppm، گرم فوتوکاتالیست: ۰/۰۲۵ گرم)

ارگانیک تحت سیستم‌های هتروژن فوتوکاتالیزوری از طریق رادیکال‌های OH^\bullet ، $\text{O}_2^{\bullet-}$ و HOO^\bullet به عنوان عامل پیش برنده قابل توجه است. این گونه‌ها در محیط آبی و در حضور اکسیژن محلول در آب، تولید می‌شوند و به عنوان گونه‌های بسیار واکنش‌پذیر به مولکول‌های ترکیب آلاینده حمله کرده و ساختار آن را تخریب می‌کنند (Padervand, 2017b).

در این میان نمی‌توان نقش گونه نقره فلزی با بار صفر در افزایش فعالیت فوتوکاتالیستی بر مید نقره و کاهش باز ترکیب الکترون-حفره در سطح آن را نادیده گرفت.

حضور این گونه در ساختار شیمیایی فوتوکاتالیست با ایجاد ترازهای اضافی در نوار انرژی ساختار پایه AgBr، باعث جلوگیری از باز ترکیب سریع الکترون-حفره به عنوان مهم‌ترین گونه‌های اکسند و کاهنده در محیط می‌شود و کارایی فرایند را در مقایسه با عدم حضور آن افزایش می‌دهد (Elahifard et al., 2007).

نتایج مربوط به بررسی سینتیک واکنش مورد نظر در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است،

تخریب نوری این حشره‌کش بر روی سطح فوتوکاتالیزور تهیه شده، از سینتیک شبه مرتبه اول پیروی می‌کند و داده‌های به دست آمده در معادله $\ln(C_0/C)$ بر حسب t ، رفتار خطی از خود نشان می‌دهند. در این معادله C_0 و C به ترتیب غلظت در هر لحظه از فرایند و غلظت اولیه آلاینده هستند. همچنین با رسم این داده‌ها

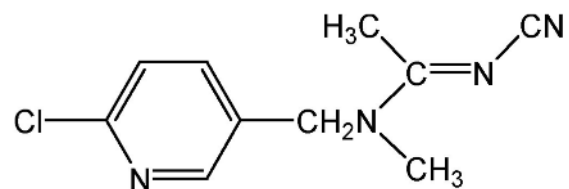


Fig. 6. The chemical structure of used contaminant (acetamiprid)

شکل ۶- ساختار شیمیایی آلاینده مورد استفاده (استامپیرید)

نشده، رادیکال‌ها فوق‌العاده واکنش‌پذیر هستند و توانایی حمله به آلاینده‌های آلی و محیط زیستی را دارند. در نتیجه انجام این فرایند، ساختار آلاینده تخریب می‌شود و غلظت و جذب آن در محلول کاهش می‌یابد. پیش‌بینی می‌شود واکنش مورد نظر بر روی سطح فعال کاتالیزور در محیط با سرعت زیادی انجام شود. نتایج به دست آمده در شکل ۵ نشان می‌دهد غلظت آلاینده استامپیرید در محلول به واسطه حضور گروه کربونیل و حلقه آروماتیک در ساختار شیمیایی آن (شکل ۶)، در مدت ۱۲ ساعت به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین بر اساس مشاهدات، در غیاب منبع نور مرئی غلظت آلاینده تغییر چشمگیری نداشت که این مطلب نشان دهنده حذف کامل این حشره‌کش با بهره‌گیری از قابلیت فوتوکاتالیزوری پودر نانو ساختار سنتز شده در محیط آبی است. مکانیسم احتمالی تخریب استامپیرید همانند دیگر آلاینده‌های

زیاد، تحت نور مرئی سنتز شدند. روش های XRD, BET, DRS و SEM برای شناسایی و تعیین ساختار نمونه ها به کار گرفته شد. نتایج XRD رشد موفقیت آمیز نانوکریستال های Ag و AgBr را درون ساختار تایید کرد. همچنین بر اساس آنالیز DRS باند گپ نیمه رسانای سنتز شده برابر ۱/۹ الکترون ولت برآورد شد. فعالیت ترکیب سنتز شده در راستای حذف حشره کش محلول در آب استامپیرید تحت نور مرئی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد غلظت آلاینده در محیط بعد از بازه زمانی ۱۲ ساعت به شدت کاهش می یابد.

همچنین مطالعه سرعت واکنش مربوطه نشان داد که این فرایند از معادله سینتیکی شبه مرتبه اول پیروی می کند و ثابت سرعتی معادل 0.145 h^{-1} دارد.

۵- قدردانی

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری های بین المللی انجام شده است.

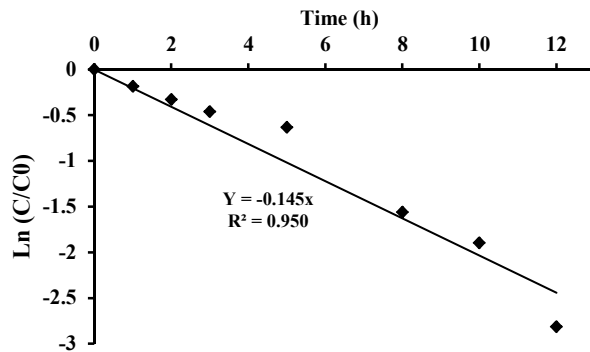


Fig. 7. Kinetic study of acetamiprid photodegradation over the prepared nanostructures in the aqueous phase

شکل ۷- مطالعه سینتیک فرایند تخریب نوری استامپیرید بر روی نانوساختار سنتز شده در فاز آبی

ثابت سرعتی معادل 0.145 h^{-1} از شیب خط حاصل شد.

۴- نتیجه گیری

ساختارهای کروی شکل Ag/AgBr با قابلیت فعالیت کاتالیزوری

References

- Ahmad, J. & Majid, K. 2018. Enhanced visible light driven photocatalytic activity of CdO-graphene oxide heterostructures for the degradation of organic pollutants. *New Journal of Chemistry*, 42, 3246-3259.
- Chen, L., Cai, T., Cheng, C., Xiong, Z. & Ding, D. 2018. Degradation of acetamiprid in UV/H₂O₂ and UV/persulfate systems: a comparative study. *Chemical Engineering Journal*, 351, 1137-1146.
- Demirci, S., Dikici, T., Yurddaskal, M., Gultekin, S., Toparli, M. & Celik, E. 2016. Synthesis and characterization of Ag doped TiO₂ heterojunction films and their photocatalytic performances. *Applied Surface Science*, 390, 591-601.
- Elahifard, M. R., Rahimnejad, S., Haghighi, S. & Gholami, M. R. 2007. Apatite-coated Ag/AgBr/TiO₂ visible-light photocatalyst for destruction of bacteria. *Journal of the American Chemical Society*, 129, 9552-9553.
- Guo, C., Song, L., LI, Y. & Zhang, S. 2018. Synthesis of V⁵⁺-doped Ag/AgCl photocatalysts with enhanced visible light photocatalytic activity. *Applied Organometallic Chemistry*, 32(4), e4237.
- Hu, Z., Quan, H., Chen, Z., Shao, Y. & Li, D. 2018. New insight into an efficient visible light-driven photocatalytic organic transformation over CdS/TiO₂ photocatalysts. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 17, 51-59.
- Hua, C., Dong, X., Wang, Y., Zheng, N., Ma, H. & Zhang, X. 2018. Synthesis of a BiOCl 1-x Br x@ AgBr heterostructure with enhanced photocatalytic activity under visible light. *RSC Advances*, 8, 16513-16520.
- Padervand, M. 2016a. Facile synthesis of the novel Ag [1-butyl 3-methyl imidazolium] Br nanospheres for efficient photodisinfection of wastewaters. *Chemical Engineering Communications*, 203, 1532-1537.
- Padervand, M. 2016b. Visible-light photoactive Ag-AgBr/ α -Ag₃VO₄ nanostructures prepared in a water-soluble ionic liquid for degradation of wastewater. *Applied Nanoscience*, 6, 1119-1126.

- Padervand, M. 2017a. Ionic liquid mediated synthesis of AgBr–Ag₃PO₄ nanostructures as highly efficient visible-light photocatalysts. *Materials Research Innovations*, 21, 279-285.
- Padervand, M. 2017b. Well-supported Ag₃VO₄–AgBr nanostructures for visible light-driven treatment of wastewaters. *Progress in Reaction Kinetics and Mechanism*, 42, 251-258.
- Tang, Y., Jiang, Z., Deng, J., Gong, D., Lai, Y., Tay, H. T., et al. 2012. Synthesis of nanostructured silver/silver halides on titanate surfaces and their visible-light photocatalytic performance. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 4, 438-446.
- Tao, S., Yang, M., Chen, H., Zhao, S. & Chen, G. 2018. Continuous synthesis of Ag/AgCl/ZnO composites using flow chemistry and photocatalytic application. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 57, 3263-3273.
- Tian, L., Sun, K., Rui, Y., Cui, W. & An, W. 2018. Facile synthesis of an Ag@AgBr nanoparticle-decorated K₄Nb₆O₁₇ photocatalyst with improved photocatalytic properties. *RSC Advances*, 8, 29309-29320.
- Wang, N., Shi, L., Yao, L., Lu, C., Shi, Y. & Sun, J. 2018. Highly improved visible-light-induced photocatalytic performance over BiOI/Ag₂CO₃ heterojunctions. *RSC Advances*, 8, 537-546.
- Zhan, S., Hou, Q., Li, Y., Ma, S., Wang, P., Li, Y. et al. 2018. AgBr/g-C₃N₄ nanocomposites for enhanced visible-light-driven photocatalytic inactivation of *Escherichia coli*. *RSC Advances*, 8, 34428-34436.
- Zhang, D., Wang, F., Cao, S. & Duan, X. 2018. Investigation on enhanced photocatalytic degradation of bisphenol A with bismuth oxyiodide catalyst using response surface methodology. *RSC Advances*, 8, 5967-5975.